

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
В СРЕДЕ *HYPERLYNX ADVANCED SOLVERS*
ДЛЯ АНАЛИЗА ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛОВ
В ЦЕПЯХ ТРЕХМЕРНОЙ МИКРОСБОРКИ
С ТОРЦЕВОЙ КОММУТАЦИЕЙ**

С.А. Батин
Д.В. Вертянов
С.С. Евстафьев

sergey.batin@mail.ru
vdv.vertyanov@yandex.ru
madcatse@gmail.com

НИУ МИЭТ, Зеленоград, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены возможности моделирования распространения электромагнитных волн для анализа целостности сигналов и электромагнитной совместимости для трехмерных микросборок с торцевой коммутацией в трех- и двумерных средах. Согласно результатам проведенного анализа, установлены преимущества использования трехмерных сред моделирования, позволяющие исследовать электрические характеристики различных изделий, включающих в себя проводники сложной формы, например микросборки с торцевой коммутацией, изделия с монтажом кристаллов методом разварки, многокристальные модули и др. Проведен анализ распространения электрических и магнитных полей в микросборке с торцевой коммутацией, выполняющей функцию линейно-частотной модуляции в составе цифровой части радара. В результате моделирования для частоты 500 МГц найдены наиболее помехогенерирующие цепи, вызывающие нежелательные выбросы напряжения в соседних сигнальных проводниках. Для определения методов улучшения качества сигнала в микросборках с торцевой коммутацией на упрощенной модели проведен анализ S-параметров для проводников на торцах изделия, расположенных на расстоянии, равном одной, двум, трем и четырем ширинам проводников. Установлено улучшение качества сигнала (примерно на 33 %) при увеличении зазора между проводниками от одной до двух и от двух до трех

Ключевые слова

Микросборка, торцевая коммутация, трехмерная компоновка, целостность сигнала, электромагнитная совместимость, S-параметры

ширин проводников. При увеличении зазора от	Поступила 16.09.2024
трех до четырех ширин проводника улучшение	Принята 25.11.2024
качества сигнала составило 15 %	© Автор(ы), 2025

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного проекта (проект № FSMR-2022-002)

Введение. Развитие микроэлектроники постоянно требует снижения габаритов, повышения степени интеграции, снижения цены и повышения надежности выпускаемых изделий [1–4]. Для достижения этого обычно применяли уменьшение размеров элементов, степени интеграции микросхем и плотности монтажа. Однако в связи с достижением определенных пределов в этой области разработчикам приходится искать новые пути для дальнейшего развития, например, применять технологии трехмерной компоновки [5]. Технология трехмерной компоновки, в отличие от классической — двумерной (рис. 1, а), позволяет увеличить плотность размещения компонентов не только за счет снижения плотности монтажа и габаритов компонентов, но и за счет размещения компонентов непосредственно друг над другом, на различных уровнях (рис. 1, б). Такой подход позволяет значительно уменьшить размеры устройств и повысить их производительность на единицу объема, что особенно актуально для современных компактных электронных систем [6, 7].

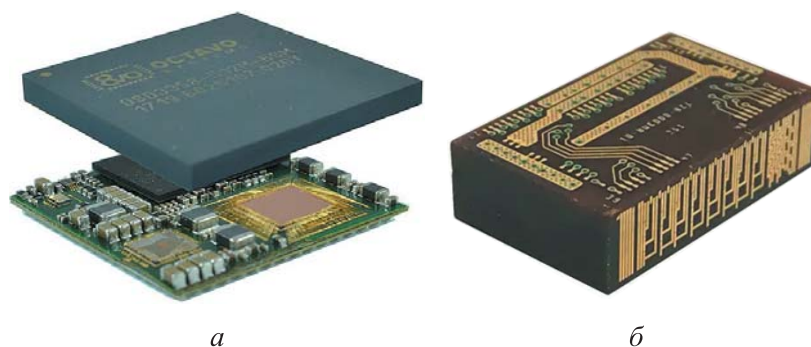


Рис. 1. Двумерная микросборка (системы в корпусе) (а) и трехмерная микросборка с торцевой коммутацией (б), изготовленная по технологии *Irvine Sensors*

Особенностью систем с вертикальной коммутацией является формирование проводящих структур, связывающих уровни микросборки [8, 9]. В результате такой коммутации удастся значительно сократить расстояния между элементами, что повышает скорость передачи данных и снижает потребление энергии [10].

Однако использование вертикальной коммутации создает проблемы при расчете целостности сигналов. Классические методы анализа целостности сигналов, применяемые для устройств с двумерной компоновкой, могут не подходить при расчете для трехмерных микросборок. Поэтому крайне важным является понимание влияния конструкции трехмерной структуры проводников на распространение сигналов в них [11]. Наиболее оптимальным методом решения проблемы будут моделирование поведения сигнала в цепях трехмерной микросборки, учитывающее распространение сигнала внутри проводников сложной формы, и анализ испускаемого ими электромагнитного излучения. Для этого можно использовать САПР для трехмерного моделирования электрических параметров, преимуществами которой являются точность, за счет использования более сложных формул для расчета по сравнению с двумерными решениями, учет трехмерных эффектов, а также комплексный анализ и сложность.

Исследование распространения электромагнитных полей в микросборке с торцевой коммутацией. Проведение анализа электромагнитной совместимости (ЭМС) критически важно для современных устройств. Он позволяет выявить, какие дорожки, компоненты и полигоны могут влиять на соседние цепи, вызывая нежелательные помехи. Эти помехи возникают в результате наводок и подразделяются на емкостные и индуктивные.

Емкостные помехи обусловлены величиной электрического поля вокруг элементов и зависят от изменений тока в определенный момент времени: чем значительнее изменение напряжения, тем выше уровень наводки [12]. Как правило, высокочастотные сигналы генерируют электрические поля, что может привести к нежелательным выбросам в близко расположенных цепях.

Индуктивные помехи определяются напряжением в цепи и создают магнитные поля аналогично индуктивным компонентам [13]. Эти помехи также влияют на соседние цепи и обычно возникают ввиду больших участков цепей питания, таких как полигоны, занимающие значительную площадь печатной платы. Одним из методов защиты от индуктивных помех является размещение полигонов земли с нулевым потенциалом, что способствует поглощению магнитных полей.

Физическая природа процесса рассеяния электромагнитных волн заключается в том, что излученное источником электромагнитное поле при взаимодействии с препятствием возбуждает на его поверхности вторичные токи, которые в свою очередь обуславливают появление электромаг-

нитного поля — рассеянного, отраженного или переизлученного [14]. Стандартными этапами моделирования распространения электромагнитных волн в современных средствах анализа являются:

- 1) ввод исходных данных: объект в виде CAD-модели, параметры источника возбуждения (направление, поляризация и частота падающей электромагнитной волны);
- 2) подготовка исходных данных. Для корректной работы метода поверхностных токов необходима триангуляция поверхности рассеивающего объекта, т. е. его разбиение на множество facets в соответствии с длиной падающей волны (создание сетки);
- 3) составление и сведение интегрального уравнения к матричному с использованием метода моментов;
- 4) решение матричного уравнения и, как результат, нахождение поверхностных токов на поверхности объекта;
- 5) расчет поля в дальней зоне для заданного направления с помощью функции Грина [15, 16].

Расчеты ЭМС для разрабатываемой трехмерной микросборки проводили в среде *HyperLynx Advanced Solvers*, модель в которую экспортирована из *Xpeditio Enterprise* (рис. 2).

Для проведения расчетов распространения электромагнитных волн задавали следующие условия: свойства материалов проводника и диэлектриков, проводимость, диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь (таблица) [17–19].

После ввода значений физических свойств материалов создается расчетная сетка. Частота узлов сетки зависит от длин волн, анализируемых в микросборке. Особенностью *HyperLynx Advanced Solvers* является то, что параметр шага сетки не задается напрямую, а формируется программой исходя из наибольшей исследуемой частоты. Для анализируемой микросборки эта частота равна 200 МГц для цифровых сигналов и 500 МГц для аналоговых. Затем указывается параметр числа ячеек на единицу длины волны. По умолчанию это значение равно 10, для быстрого анализа его рекомендуется снизить до 6. Результаты моделирования распространения магнитных и электрических полей приведены на рис. 3, 4.

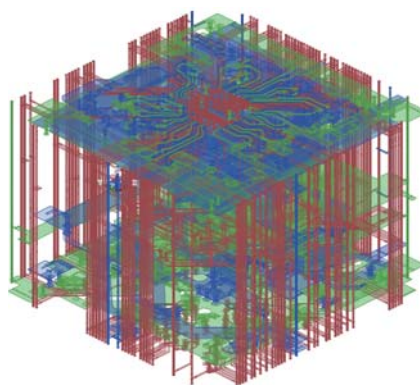


Рис. 2. 3D-модель цепей микросборки в *HyperLynx Advanced Solvers*

**Физические свойства материалов, используемых при моделировании
для частоты 1 ГГц**

Материал	Проводимость, См/м	Диэлектрическая постоянная	Тангенс угла диэлектрических потерь
<i>Диэлектрик</i>			
Воздух	–	1	0
FR-4	–	4,7	0,02
<i>Проводник</i>			
Медь	$5,8 \cdot 10^7$	–	–
Припой	$6,9 \cdot 10^6$	–	–

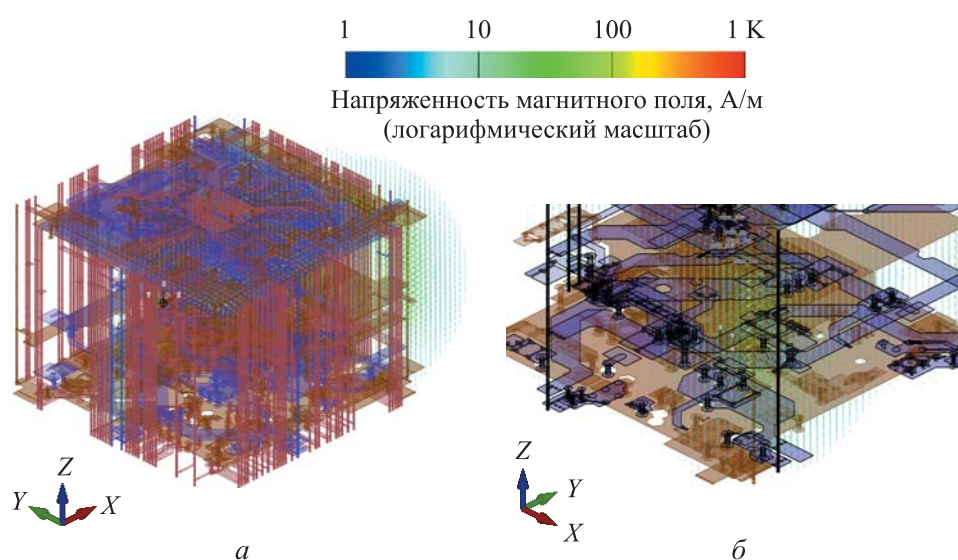


Рис. 3. Распространение магнитных полей в микросборке (*а*) и приближенный вид на участок с большей концентрацией магнитных полей и скрытыми сигнальными цепями (*б*)

Результаты проведенного анализа показывают, что в среднем значение напряженности магнитного поля в исследуемой микросборке находится на уровне 80 А/м, однако в правой части микросборки, где располагаются полигоны питания для напряжений 3,3 и 5 В (цепи DVDD_3V3, DVDD_5V на рис. 3 обозначены фиолетовым цветом), происходит значительное повышение этого значения (до 250 А/м). Это может привести к возникновению помех в цепях, расположенных рядом с указанными участками, особенно в цепях, отвечающих за тактовую частоту и передачу данных. Для минимизации влияния таких помех рекомендуется применять экрани-

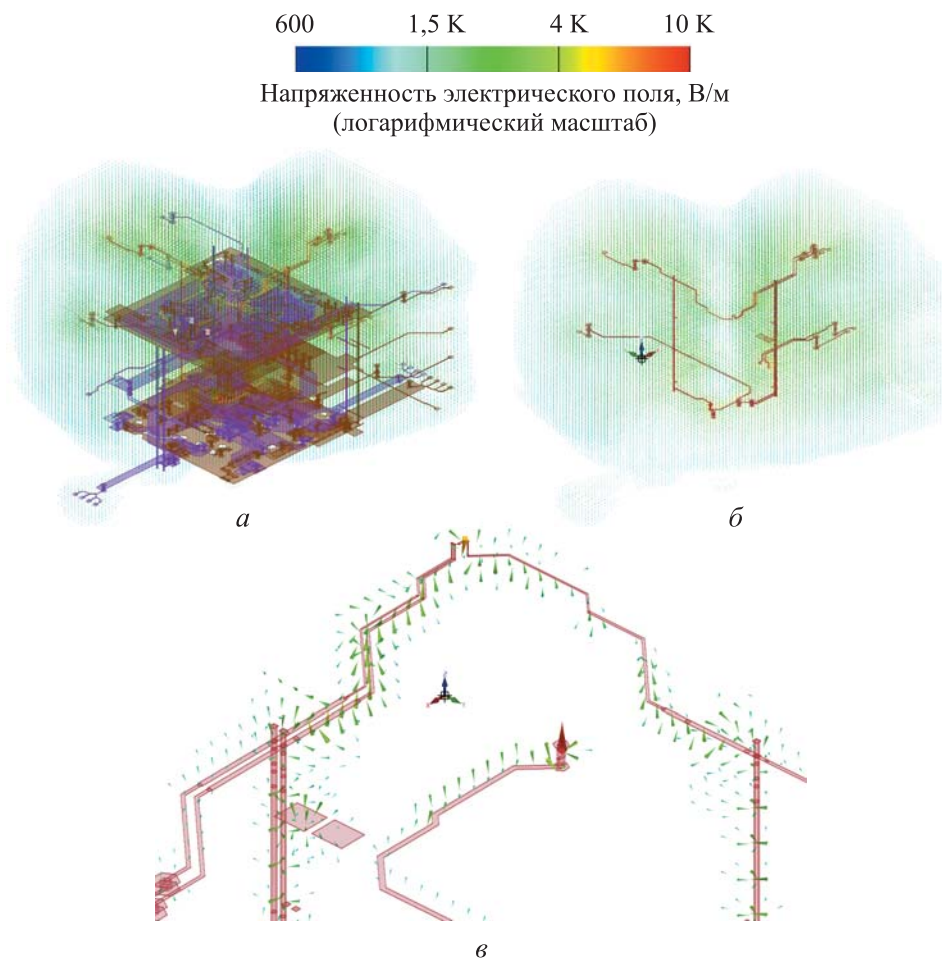


Рис. 4. Распространение электрического поля в микросборке для дифференциальных пар и одиночных проводников (а), цепи и полигоны питания и земли скрыты (б), приближенный вид на цепи с большей концентрацией электрических полей и скрытыми цепями, полигонами питания и земли (в)

рующие области или рассредоточить полигоны питания по площади модуля управления.

Электрические поля также могут вызывать емкостные помехи в близко расположенных цепях. В отличие от индуктивных, воздействие емкостных помех зависит от скорости изменения напряжения, а не от его статической величины. Для определения влияния электрических полей на цепи «жертвы» из анализируемой микросборки выделены несколько цепей для моделирования, а именно дифференциальная пара проводников и несколько одиночных проводников. Результаты моделирования распространения электрических полей в некоторых цепях микросборки (дифференциальные

пары и одиночные проводники обозначены красным цветом) приведены на рис. 4.

Результаты анализа моделирования электрических полей показали, что значения напряженности электрического поля для указанных цепей находятся до 10 кВ/м. Такие значения могут вызывать выбросы энергии в соседних цепях, создавая перекрестные помехи.

Анализ зависимости помех от зазора между проводниками. Для минимизации помех принимают несколько мер, в том числе увеличение расстояния между проводниками, перенос их на различные слои или экранирование. При проектировании печатных плат используют правило трех ширин, которое рекомендует устанавливать зазор между проводниками, равный 3 и более ширинам проводника. В соответствии с зависимостью перекрестных помех от расстояния между проводниками увеличение расстояния уменьшает помехи пропорционально квадрату зазора. Перекрестные помехи бывают прямыми и обратными. Их также называют перекрестными помехами на дальнем конце линии передачи (FEXT) и на ближнем (NEXT) в зависимости от того, где эти помехи измеряются (на нагрузке или приемнике).

Для быстрой оценки значений перекрестных помех на дальнем конце можно использовать аналитическое выражение [20]

$$k_f = 0,5 \left(\frac{C_m}{C_{tot}} - \frac{L_m}{L_{tot}} \right),$$

на ближнем конце —

$$k_b = 0,25 \left(\frac{C_m}{C_{tot}} + \frac{L_m}{L_{tot}} \right),$$

где k_f , k_b — прямой и обратный шум; C_m, C_{tot} — взаимная и суммарная емкости; L_m, L_{tot} — взаимная и суммарная индуктивности.

Для определения зависимости значений перекрестных помех в торцевой коммутации от зазора между ними на примере исследуемой микросборки создана упрощенная модель изделия. В этой модели применяют проводники шириной 0,2 мм со значениями зазора, мм: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8. Упрощенная модель приведена на рис. 5, результаты моделирования S-параметров в исследуемых цепях на частотах до 1 ГГц — на рис. 6.

Результаты моделирования показали, что сигнал с уменьшением зазора ухудшается. Для различных значений зазора между проводниками на частоте 500 МГц отношение сигнал/шум составило: для 0,2 мм 0,95455,

для 0,4 мм 0,97064, для 0,6 мм 0,98067, для 0,8 мм 0,98377. Таким образом, эмпирическое правило трех ширин проводников в рассматриваемом случае подтверждается результатами моделирования и может быть применено и при проектировании устройств с торцевой коммутацией. При изменении расстояния между дорожками от 0,2 до 0,4 и до 0,6 заметно существенное улучшение сигнала примерно на 33 %, в то время, когда дальнейшее увеличение до 0,8 мм снижает помехи лишь на 15 %.

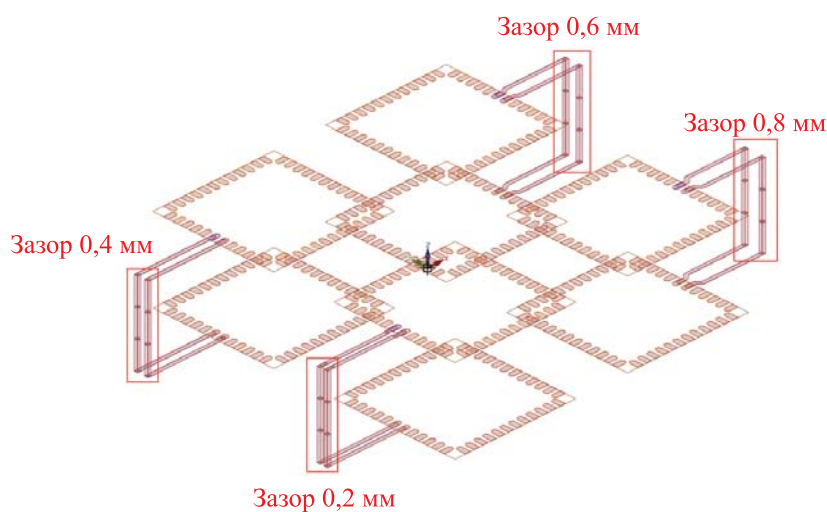


Рис. 5. Упрощенная модель для анализа S-параметров при различных значениях зазора между проводниками

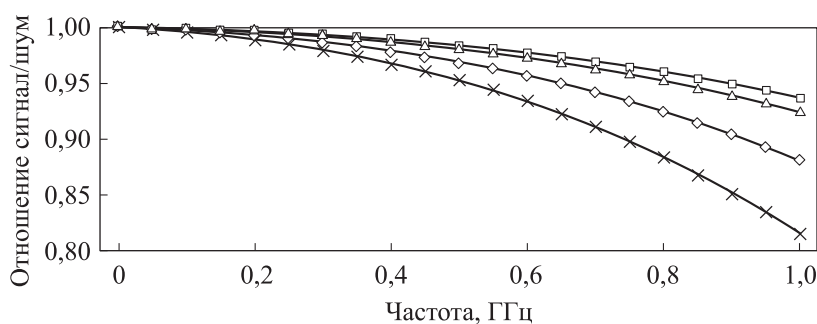


Рис. 6. Зависимость вносимых потерь (отношение сигнал/шум) от частоты для торцевой коммутации при значениях зазора 0,2 (x), 0,4 (◇), 0,6 (△) и 0,8 мм (□)

Закключение. Проанализированы различные САПР, позволяющие моделировать целостность сигналов в электронных изделиях, содержащих проводники сложной формы. Установлено, что для анализа типовых электронных устройств, например печатных плат, оптимальным решением

будет использование двумерных сред моделирования. Однако двумерные САПР не подходят для анализа таких изделий, как микросборки с торцевой коммутацией, и для этого требуется использовать трехмерные решения.

В процессе моделирования целостности сигналов в микросборке с торцевой коммутацией выявлены зоны максимальной напряженности электрического и магнитного полей, которые могут вызывать нежелательные выбросы напряжения, негативно влияющие на качество сигнала. Проведено моделирование S-параметров в упрощенной микросборке с торцевой коммутацией и с использованием трехмерного САПР. Установлено, что качество сигнала в цепях с торцевой коммутацией значительно улучшается при увеличении зазора между проводниками до значения в три ширины. Дальнейшее увеличение зазора (более трех ширин проводников) уменьшает помехи менее значительно.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kang J.-H., Shin H., Kim K., et al. Monolithic 3D integration of 2D materials-based electronics towards ultimate edge computing solutions. *Nat. Mater.*, 2023, vol. 22, no. 12, pp. 1470–1477. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41563-023-01704-z>
- [2] Patti R. Three-dimensional integrated circuits and the future of system-on-chip designs. *Proc. IEEE*, 2006, vol. 94, no. 6, pp. 1214–1224. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.873612>
- [3] Topol A., La Tulipe D., Shi L., et al. Three-dimensional integrated circuits. *IBM Journal of Research and Development*, 2006, vol. 50, no. 4-5, pp. 491–506. DOI: <https://doi.org/10.1147/rd.504.0491>
- [4] Lipton R. 3D-vertical integration of sensors and electronics. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2007, vol. 579, iss. 2, pp. 690–694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.05.271>
- [5] de Jong E., Ferreira L.A., Bauer P. 3D integration with PCB technology. *IEEE APEC*, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/APEC.2006.1620639>
- [6] Li Y., Goyal D., eds. 3D microelectronic packaging. In: *Springer Series in Advanced Microelectronics*, vol. 64. Singapore, Springer, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-7090-2>
- [7] Lindner P., Glinsner T., Uhrmann T., et al. Key enabling processes for more-than-more technologies. *IEEE SOI*, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/SOI.2012.6404360>
- [8] Кочергин М.Д., Вертянов Д.В. Способы вертикальной коммутации в 3D-микросборках. *Интеллектуальные системы и микросистемная техника. Сб. тр. науч.-практ. конф.* М., МИЭТ, 2022, с. 160–166. EDN: WPEHPX
- [9] Dunton V., Chen T., Konevecki M., et al. Zias: vertical wires in 3-D memory devices. *Proc. VMIC*, 2005, pp. 480–485.

- [10] Park J., Li C., Mok E. New vertical connection in PCB and its scalable model. *TechRxiv*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.171259651.11084104/v1>
- [11] Kim J., Kim J., Mihai R., et al. Via and reference discontinuity impact on high-speed signal integrity. *Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2004, vol. 2, pp. 583–587. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2004.1349863>
- [12] Скорняков И.А., Суровцев Р.С. Анализ влияния ширины развязывающей трассы на амплитуду перекрестных наводок в связанной двухпроводной линии. *Сб. избранных статей научной сессии ТУСУР*, 2021, № 1-2, с. 86–91. EDN: YTJJPT
- [13] Иванова Е.В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах. Дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, НГАВТ, 2006.
- [14] Обуховец В.А. Излучение и рассеяние электромагнитных волн. *Антенны*, 2016, № 8, с. 6–15. EDN: WJXGMR
- [15] Антипин Б.М., Виноградов Е.М. Анализ моделей для оценки потерь распространения сигналов при расчетах электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. *СПбНТОРЭС: тр. ежегодной НТК*, 2021, № 1, с. 233–235. EDN: DYOVPL
- [16] Преображенский А.П. Методы прогнозирования характеристик рассеяния электромагнитных волн. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*, 2014, № 1. URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=90>
- [17] Усанов Д.А., Постельга А.Э., Усанов А.Д. Изменение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды на СВЧ при совместном воздействии низкочастотного и постоянного магнитных полей. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, 2009, т. 12, № 1, с. 34–38. EDN: KALOPJ
- [18] Иванов С.В., Котляренко Н.И. Современные материалы для изготовления гибридных многослойных печатных плат. *Тр. Междунар. симп. «Надежность и качество»*, 2012, т. 2, с. 211–212. EDN: PCCAPZ
- [19] Armghan A. Characterization of dielectric substrates using dual band microwave sensor. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 62779–62787. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3075246>
- [20] Mudavath R., Naik B.R., Gugulothu B. Analysis of crosstalk noise for coupled microstrip interconnect models in high-speed PCB design. *ICEIC*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.23919/ELINFOCOM.2019.8706385>

Батин Сергей Андреевич — инженер-конструктор НИЛ ТКПМ Института НМСТ НИУ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Вертянов Денис Васильевич — начальник НИЛ ТКПМ Института НМСТ НИУ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Евстафьев Сергей Сергеевич — доцент Института НМСТ НИУ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Батин С.А., Вертянов Д.В., Евстафьев С.С. Использование трехмерного моделирования в среде *HyperLynx Advanced Solvers* для анализа целостности сигналов в цепях трехмерной микросборки с торцевой коммутацией. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2025, № 1 (150), с. 4–17.
EDN: YZDDDS

**USING THREE-DIMENSIONAL MODELING
IN THE HYPERLYNX ADVANCED SOLVERS ENVIRONMENT
TO ANALYZE THE INTEGRITY OF SIGNALS IN CIRCUITS
OF A THREE-DIMENSIONAL WITH BACKSIDE
METALLIZATION MICROASSEMBLY**

S.A. Batin

D.V. Vertyanov

S.S. Evstafyev

sergey.batin@mail.ru

vdv.ertyanov@yandex.ru

madcatse@gmail.com

**National Research University of Electronic Technology, Zelenograd,
Moscow, Russian Federation**

Abstract

The paper discusses the possibilities of modeling the propagation of electromagnetic waves to analyze signal integrity and electromagnetic compatibility for three-dimensional end-switched microassemblies in three- and two-dimensional media. According to the results of the analysis, the advantages of using three-dimensional modeling environments are determined, which make it possible to study the electrical characteristics of various products that include complex-shaped conductors, such as end-switched microassemblies, products with the installation of crystals by the wirebonding method, multi-chip modules, etc. The propagation of electric and magnetic fields in a microassembly with end-mounted switching, which performs the function of linear frequency modulation as part of the digital part of the radar, is analyzed. As a result of the simulation, for a frequency of 500 MHz, the most interference-generating circuits are found, causing unwanted voltage surges in neighboring signal conductors. To determine methods for improving signal quality in end-switched microassembly, the simplified model analyzes the S-parameters for conductors at the ends of the product located

Keywords

Microassembly, backside metallization, three-dimensional, signal integrity, electromagnetic compatibility, S-parameters

at a distance equal to one, two, three and four conductor widths. The signal quality is improved (by about 33 %) by increasing the gap between the conductors from one to two and from two to three conductor widths. With an increase in the gap from three to four conductor widths, the improvement in signal quality was 15 %

Received 16.09.2024

Accepted 25.11.2024

© Author(s), 2025

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state project (project no. FSMR-2022-002)

REFERENCES

- [1] Kang J.-H., Shin H., Kim K., et al. Monolithic 3D integration of 2D materials-based electronics towards ultimate edge computing solutions. *Nat. Mater.*, 2023, vol. 22, no. 12, pp. 1470–1477. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41563-023-01704-z>
- [2] Patti R. Three-dimensional integrated circuits and the future of system-on-chip designs. *Proc. IEEE*, 2006, vol. 94, no. 6, pp. 1214–1224. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.873612>
- [3] Topol A., La Tulipe D., Shi L., et al. Three-dimensional integrated circuits. *IBM Journal of Research and Development*, 2006, vol. 50, no. 4-5, pp. 491–506. DOI: <https://doi.org/10.1147/rd.504.0491>
- [4] Lipton R. 3D-vertical integration of sensors and electronics. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2007, vol. 579, iss. 2, pp. 690–694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.05.271>
- [5] de Jong E., Ferreira L.A., Bauer P. 3D integration with PCB technology. *IEEE APEC*, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/APEC.2006.1620639>
- [6] Li Y., Goyal D., eds. 3D microelectronic packaging. In: *Springer Series in Advanced Microelectronics*, vol. 64. Singapore, Springer, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-7090-2>
- [7] Lindner P., Glinsner T., Uhrmann T., et al. Key enabling processes for more-than-more technologies. *IEEE SOI*, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/SOI.2012.6404360>
- [8] Kochergin M.D., Vertyanov D.V. [Methods of vertical commutation in 3d microassemblies]. *Intellektualnye sistemy i mikrosistemnaya tekhnika. Sb. tr. nauch.-prakt. konf. [Intelligent Systems and Microsystems Engineering. Proc. Sci.-Pract. Conf.]*. Moscow, MIET Publ., 2022, pp. 160–166 (in Russ.). EDN: WPEHPX
- [9] Dunton V., Chen T., Konevecki M., et al. Zias: vertical wires in 3-D memory devices. *Proc. VMIC*, 2005, pp. 480–485.
- [10] Park J., Li C., Mok E. New vertical connection in PCB and its scalable model. *TechRxiv*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.171259651.11084104/v1>
- [11] Kim J., Kim J., Mihai R., et al. Via and reference discontinuity impact on high-speed signal integrity. *Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2004, vol. 2, pp. 583–587. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMC.2004.1349863>

- [12] Skorniyakov I.A., Surovtsev R.S. [Analysis of decoupling trace width effect on amplitude of crosstalk in a coupled two-wire line]. *Sb. izbrannykh statey nauchnoy sessii TUSUR* [TUSUR Scientific Session: Collection of Selected Papers], 2021, no. 1-2, pp. 86–91 (in Russ.). EDN: YTJJPT
- [13] Ivanova E.V. *Konduktivnye elektromagnitnye pomekhi v elektroenergeticheskikh sistemakh*. Dis. d-ra tekhn. nauk [Conductive electromagnetic disturbances in electric power systems. Dr. Sc. (Eng.) Diss.]. Novosibirsk, SSUWT Publ., 2006.
- [14] Obukhovets V.A. Radiation and scattering of electromagnetic waves. *Antenny* [Antennas], 2016, no. 8, pp. 6–15 (in Russ.). EDN: WJXGMR
- [15] Antipin B.M., Vinogradov E.M. Analysis of models for estimating signal propagation losses in calculations of electromagnetic compatibility of radio-electronic devices. *SPbNTORES: tr. ezhegodnoy NTK*, 2021, no. 1, pp. 233–235 (in Russ.). EDN: DYOVPL
- [16] Preobrazhenskiy A.P. The methods of predicting the characteristics of scattering of electromagnetic waves. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii* [Modeling, Optimization and Information Technology], 2014, no. 1 (in Russ.). Available at: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=90>
- [17] Usanov D.A., Postelga A.E., Usanov A.D. Change of permittivity and water dielectric loss tangent under joint low-frequency and direct magnetic field influence at microwave. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of Wave Processes and Radio Systems], 2009, vol. 12, no. 1, pp. 34–38 (in Russ.). EDN: KALOPJ
- [18] Ivanov S.V., Kotlyarenko N.I. Modern materials for manufacturing of hybrid multilayer printed circuit boards. *Tr. Mezhdunar. simp. "Nadezhnost i kachestvo"* [Transactions of the International Symposium on Reliability and Quality], 2012, vol. 2, pp. 211–212 (in Russ.). EDN: PCCAPZ
- [19] Armghan A. Characterization of dielectric substrates using dual band microwave sensor. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 62779–62787.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3075246>
- [20] Mudavath R., Naik B.R., Gugulothu B. Analysis of crosstalk noise for coupled microstrip interconnect models in high-speed PCB design. *ICEIC*, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.23919/ELINFOCOM.2019.8706385>

Batin S.A. — Design Engineer, Scientific Research Laboratory Advanced Technologies of 3D Microsystems Enclosure and Production, Institute of Nano- and Microsystem Engineering, National Research University of Electronic Technology (Shokina ploshchad 1, Zelenograd, Moscow, 124498 Russian Federation).

Vertyanov D.V. — Head of the Scientific Research Laboratory Advanced Technologies of 3D Microsystems Enclosure and Production, Institute of Nano- and Microsystem Engineering, National Research University of Electronic Technology (Shokina ploshchad 1, Zelenograd, Moscow, 124498 Russian Federation).

Evstafyev S.S. — Assoc. Professor, Institute of Nano- and Microsystem Engineering, National Research University of Electronic Technology (Shokina ploshchad 1, Zelenograd, Moscow, 124498 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Batin S.A., Vertyanov D.V., Evstafyev S.S. Using three-dimensional modeling in the *HyperLynx Advanced Solvers* environment to analyze the integrity of signals in circuits of a three-dimensional with backside metallization microassembly. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2025, no. 1 (150), pp. 4–17 (in Russ.). EDN: YZDDDS